

研究報告

邱氏密度管理量表應用於柳杉林分生長評估 及疏伐規劃之研究

邱祈榮¹⁾ 鄭景鵬^{2,4)} 詹為巽^{2,3)}

摘要

本研究為柳杉人工林的現況評估與疏伐規劃，發展出一套僅使用林分胸徑與林分密度即能簡易操作的邱氏密度管理量表。量表的製作首先匯整林務局的永久樣區、臺大實驗林的長期試驗地進行資料庫形式的偵錯反饋，接著統計各齡級的林分密度、平均胸徑二次平均胸徑進行PR分級。再透過Schnute生長模式各適配一條代表該PR等級之生長曲線，分別組合成「林齡級-平均胸徑」、「林齡級-二次平均胸徑」與「林齡級-林分密度」此三種生長基線曲線組，作為建立邱氏密度管理量表之基礎，整體而言誤差率皆在0.16%以下，顯示該曲線能在其範圍內進行有效的模擬與應用。吾人能藉由PR50的生長基線為參考線，用以評估不同地區柳杉人工林生長優劣，也能利用各PR等級曲線參數預測生長，以作為各林分採取經營活動與評估資訊之基礎；進一步組合曲線組為「邱氏密度管理量表」，該量表包含「林齡級-平均胸徑-林分密度」與「林齡級-二次平均胸徑-林分密度」兩種林分胸徑的統計特性。我們能參考量表中點出目標林分的實際點位、相對應的基線點位與林地現況規劃應進行何種疏伐措施，進一步評估伐採後期望的生長軌跡，由此作為伐採強度的基準或是預定伐採的期程。

關鍵詞：柳杉、胸徑大小與密度關係、林分生長、疏伐。

邱祈榮、鄭景鵬、詹為巽。2022。邱氏密度管理量表應用於柳杉林分生長評估及疏伐規劃之研究。台灣林業科學37(1):1-20。

¹⁾國立臺灣大學森林環境暨資源學系，副教授。10617臺北市大安區羅斯福路四段一號 Associate Professor, School of Forestry and Resource Conservation, National Taiwan Univ. 1 Roosevelt Road, Sec. 4, Taipei 10617, Taiwan.

²⁾國立臺灣大學森林環境暨資源學系，博士生。10617臺北市大安區羅斯福路四段一號 PhD Student, School of Forestry and Resource Conservation, National Taiwan Univ. 1 Roosevelt Road, Sec. 4, Taipei 10617, Taiwan.

³⁾行政院農業委員會林業試驗所林業經濟組，助理研究員，10066台北市中正區南海路53號 Assistant Researcher, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Forestry Economics Division, 53 Nanhai Rd., Zhongzheng Dist., Taipei 10066, Taiwan.

⁴⁾通訊作者 Corresponding author, e-mail:d03625003@ntu.edu.tw

2021年10月送審 2022年3月通過 Received October 2021, Accepted March 2022.

Research paper

Study of Applying Chiou's Density Management Diagram for Growth Evaluation and Thinning Planning of *Cryptomeria japonica* Plantations

Chyi-Rong Chiou¹⁾ Ching-Peng Cheng^{2,4)} Wei-Hsun Chan^{2,3)}

[Summary]

In this study, a set of Chiou's density management diagrams (CDMDs) was developed, which could be easily operated via the mean diameter at breast height (DBH), quadratic mean diameter (QMD), and stand density for assessment and thinning planning of *Cryptomeria japonica* plantations. At first, permanent plots of the Forestry Bureau and long-term experimental plots of National Taiwan University Experimental Forest were collected to debug feedback in the form of a database, and then we calculated the stand density, DBH, and QMD of each age-class for classification of the percentile rank (PR). Each of the growth curves representing PR classes were fitted through the Schnute model, and these were combined to form the basis for establishing age-DBH, age-QMD, and age-stand density from the baseline curve groups. Overall, the error was below 0.16%, which showed that the baseline curve groups could be effectively simulated and applied within the scope. As basic information for evaluation and management of each *C. japonica* plantation, the baseline PR50 served as a reference to assess the growth of *C. japonica* plantations in different regions, but we also used parameters of each PR curve to predict stand growth. The final curve groups were combined into CDMDs, which included two statistical characteristics of stand diameters as an age-DBH-density diagram and an age-QMD-density diagram. For thinning plans, we could refer to current stand structure, point out the practical positions of the target stand and the corresponding baseline positions from CDMDs, and further assess the expected growth trajectory after cutting, which could be used as a benchmark for the thinning intensity or as a schedule for thinning.

Key words: *Cryptomeria japonica*, size-density relationship, stand growth, thinning.

Chiou CR, Cheng CP, Chan WH. 2022. Study of applying Chiou's density management diagram for growth evaluation and thinning planning of *Cryptomeria japonica* plantations. Taiwan J For Sci 37(1):1-20.

前言

柳杉自1900年代初期由日本引進，如今已成為臺灣山區潛在的重要木材資源，也是日本當前的重要木材資源之一。據林務局第四次森林資源調查的人工針葉林統計數字中顯示，柳杉造林面積為41,390 ha，平均蓄積量為388.89

m³ ha⁻¹，到目前為止仍為全臺平均單位面積蓄積量最高的人工針葉林。Chiou et al. (2012)研究2012年的臺灣區合板製造輸出業同業公會發行之臺灣合板工業年報資料指出，臺灣的進口木材比例高達99%以上，木材自給率不到1%，據

林務局近10年統計報表(2011~2020)，臺灣每年進口的木材大約是410~640萬 m^3 左右；然而。目前有許多國家為保護自己的自然環境與森林生態系，紛紛制定不同的森林經營規範，可以預見未來國際間的木材出口貿易情況，將會依受到各國的天然資源與政經條件將有所限制，因此臺灣木材進口的數量一定會受到影響。

一般以木材生產為主要目地之林業經營，其首要目標為在永續經營的基礎下增加林木的生長以得到更多材積收穫，或者提升木材之品質以提高林木價值(Zeide 2004)。因此，如何有效的提升臺灣木材自給率至關重要。如何於單位林地面積內產出最大的材積收穫量，並以較低的成本進行林分經營，都是獲益的重要關鍵。由長期的立木蓄積(growth stocking)變化趨勢來看，人工林林分的生長與收穫受樹種特性、林分結構、立地環境，以及天然災害敏感性影響，這些特徵主要取決於森林經營的策略(Zeng et al. 2004, Yoshida and Noguchi 2009)。而森林亦扮演固碳之重要角色也屬於生質能重要的一環，如何有效推估森林生長量，是於預測碳吸存量時之重要基礎(Lin et al. 2002)。進一步來說，在輪伐期的規劃中，了解作業成本的結構(Cho 2013)同時結合有效的密度管理促進其產能有助於達成2030年林業淨零碳排的目標。

長期以來，Terasaki (1905, 1963)與Ashton and Kilty (2018)所論及的疏伐(或間伐)原則，這些純理論的措施大大的影響了臺灣人工林的密度管理。尤其林業單位進行撫育措施或密度管理時，通常為達滿足節省成本與促進留存木的生長目的，常合併間伐(intermediate cutting)的多種施作原則進行，大多於施行疏伐(thinning)時一併進行除害伐(salvage cutting)、衛生伐(sanitation cutting)、整理伐(improvement cutting)等屬於育林作業的措施，至於管理者應施行何種措施，是定性或是定量原則，使其施作後產生最大的效益，是長期備受關注的問題。

Yang (1975)與Kao (1982)曾利用臺大實驗林轄區內的柳杉長期試驗地調查結果發展柳

杉林分密度管理圖、最佳疏伐與輪伐期之經濟分析，在當時為柳杉人工林的經營策略提出了重要的參考工具。然而，目前臺灣大部分地區的柳杉人工林已經超過了理論上所制定的輪伐期林齡，其林分密度管理圖的利用上有所受限。目前國外已有許多人工林轉為長輪伐期的經營方式，以長伐期大徑木育林體系建造多樣性階層、大徑級之恆續收穫林(Watanabe 2005, Mochizuki et al. 2020)，由此可見我們也能藉由密度管理重新擬定柳杉長輪伐期的策略，進一步掌握大徑級林木經營的生長量與收穫效益。

為更有效的幫助目前柳杉人工林疏伐的規劃，我們透過現有的資料整合深究新的評估方針，僅利用林分胸徑與林分密度來進行柳杉人工林進行密度控制與生長預測，本研究重新整合文獻與Chiou et al. (2014)建立的柳杉林分平均胸徑生長基線，發展出「林齡-平均胸徑-林分密度」組圖(age-DBH-density diagram)與「林齡-二次平均胸徑-林分密度」組圖(age-QMD-density diagram)為邱氏密度管理量表(Chiou's density management diagram)，此一結果能作為柳杉人工林密度管理的參照基準，俾利柳杉人工林密度控制之應用。

材料與方法

本研究的流程如Fig.1所示，首先針對臺大實驗林長期試驗地、林務局永久樣區兩巨量的調查數據進行偵錯反饋(debug feedback)，統計出各樣區的林分平均胸徑、二次平均胸徑(或稱平均胸高斷面積直徑)、平均樹高、林分密度等林分結構之屬性，藉由不同年份的同一樣區統計資料進行資料偵錯，由此比對出可疑的數據，進一步比對台帳紀錄反饋到資料庫裡，將修正後的數據重新計算再行百分層級(percentile rank (PR))分級。

接著應用Schunte生長模式擬合不同齡級的「林齡級-林分胸徑」以及「林齡級-林分密度」的關係，建立各PR分級的曲線組，進一步組合曲線組為「邱氏密度管理量表」，該量表包含「林齡級-平均胸徑-林分密度」與「林齡級-二

次平均胸徑-林分密度」，適用於兩種林分胸徑的統計特性，再置入文獻中的數據進行驗證，比對兩種林分胸徑的評估結果與預測能力，最後討論Ashton and Kelty (2018)論及的四種模擬疏伐模式置入邱氏密度管理量表的結果，作為疏伐規劃之參考。

一、資料來源

本研究數據除沿用Chiou et al. (2020)使用的資料外，並新增樣區資料納入研究，總計使用林務局222個樣區525筆資料，以及臺大實驗林20處長期試驗地612筆資料，總數1137筆資料進行分析。

二、分析方法

(一)資料統計、偵錯反饋與分級

將所有試驗地的林齡、平均胸徑、二次平

均胸徑、林分密度、胸高斷面積等林分性態值進行敘述統計後，檢視數據最大值、最小值、離散程度等以及不同年份的同一樣區數據特質來執行偵錯反饋，由此挑出可疑的數據比對台帳資料的紀載與移除重複置入的樣本後，將校正後的數據反饋到台帳紀錄，並重新進行資料的敘述統計。

然而，偵錯反饋時發現Chiou et al. (2014)大部分的柳杉文獻數據與臺大實驗林長期試驗地同源，故在此部分使用偵錯反饋後的資料，並且篩選6年生以上之資料，最終將修正後的數據置入資料庫再進一步將資料進行百分層級分級。

由於少數的高齡級林齡於本研究所蒐集之資料量不足，因此首先將林分胸徑資料依林齡以5年為一齡級進行分群，一齡級之年分以該齡級之上界值為代表，如6~10年生之資料均以屬齡級10，其中林齡6至70年以5年為一齡級，但限於70年後資料樣本較低，故70至80年生林

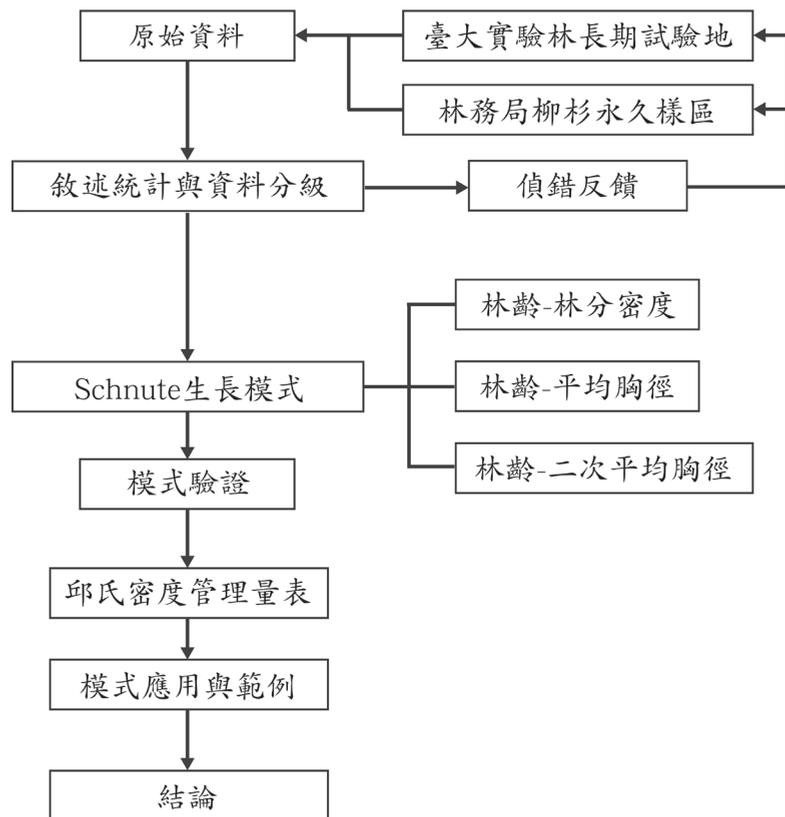


Fig. 1. Flow diagram.

齡，以10年為一齡級，林齡資料共分為14組。

或許由於臺灣許多文獻先例和大眾廣泛的使用習慣，使得大部分林業從事人員大多在提出林分胸徑統計摘要與調查數據呈現皆使用算術平均數來呈現平均林分胸徑。綜觀國際上的林業文獻可見二次平均胸徑或稱平均胸高斷面積直徑(quadratic mean diameter (QMD))的使用較具廣泛性，因此本研究在繪製邱氏密度管理量表時，一併計算平均胸徑(diameter at breast height (DBH))值與QMD數值並探討其差異。

QMD計算如公式1所示。BA為胸高斷面積(basal area)， n 為單位面積株數， k 為常數，當BA單位為 ft^2 (square feet)時 $k = 0.005454$ ，當BA單位為 m^2 (square meters)時， $k = 0.0000785$ 。

$$QMD = \sqrt{BA/(k \times n)} \quad (cm). \dots\dots\dots(1)$$

(二)曲線擬合

首先將前述計算出來的14組齡級平均胸徑、QMD與林分密度值由小到大排序，並依序分級為10 percentile rank (PR10)、PR20、PR30至PR90，以林齡為X軸，平均胸徑、QMD與林分密度的各PR等級為Y軸，透過Schnute生長模式(Schnute 1981)進行擬合(公式2)，各適配一條代表該PR等級之生長曲線。因此平均胸徑、QMD與林分密度各可適配9條生長曲線，並外推齡級90年生的數值，分別組合成「林齡級-平均胸徑」、「林齡級-二次平均胸徑」與「林齡級-林分密度」此三種生長基線曲線組，作為建立邱氏密度管理量表之基礎。Schnute生長模式的特質即參數能夠有效的轉化為不同生長模式的形式，由此進一步探討各參數之間的關係。

Schnute生長模式如公式2所示。 y 為欲計算之林齡 t 的生長量； y_1 為 t_1 時之生長量； y_2 為 t_2 時之生長量； t 為欲計算之林齡； t_1 為模擬之林齡範圍下界(lower bound)； t_2 為模擬之林齡範圍上界(upper bound)； a ； b 為模式參數。

$$y = \left[y_1^b + (y_2^b - y_1^b) \times \frac{(1 - e^{-a(t-t_1)})}{(1 - e^{-a(t_2-t_1)})} \right]^{\frac{1}{b}} \dots\dots\dots(2)$$

由於Schnute模式為多參數的非線性模式，擬合時容易出現無法收斂的狀況，故設置初始值前先評估曲線可能發展的形狀屬於第幾型，依定義輸入所屬的參數範圍，再利用Excel表的「規劃求解」求解最小平方殘差值的最小值，進行多次測試符合曲線類型的初始參數後，再將獲得收斂的參數們置入R語言擬合。

最後根據生長模式所擬合的各PR等級生長基線組，以平均胸徑與QMD分別為X軸，林分密度為Y軸，並依齡級以及PR分別連線，繪製臺灣地區柳杉人工林之「林齡-平均胸徑-林分密度」分級圖(age-DBH-density diagram)與「林齡-二次平均胸徑-林分密度」分級圖(age-QMD-density diagram)為邱氏密度管理量表(Chiou's density management diagram)兩種曲線組圖，作為評估全臺灣不同齡級柳杉林分生長量之基準量表。

(三)模式驗證

常見評估回歸模型典型的指標分別是均值偏差(mean bias error (MBE))、平均絕對誤差(mean absolute error (MAE))、平均絕對百分誤差(mean absolute percentage error (MAPE))、均方根誤差(root mean squared error (RMSE))、平均均方誤差(mean squared error (MSE))、平均均方對數誤差(mean squared logarithmic error (MSLE))等公式，其代表誤差的數值皆越小越好，本研究採用MAPE與RMSE評估其誤差(公式3、4)。 n 為數量， y_i 為觀察值， \hat{y}_i 為模擬值。

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(\hat{y}_i - y_i)}{y_i} \right| \dots\dots\dots(3)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (unit) \dots\dots\dots(4)$$

(四)驗證實例

由於邱氏密度管理量表主要樣本為未疏伐林分，因此胸徑大小與密度關係隨林齡變動具高度相關性，邱氏密度管理量表即是藉此特質進行評估與比較；利用邱氏密度管理量表進行評估林分狀態時，得先點出目標林分所屬林齡在平均生長基線的基線點位，再將欲評估的林

分狀態(林分胸徑與林分密度)點出實際點位，由點位的相對位置評估與進行密度管理的措施規畫。

為驗證其實用性，引述文獻中的數據將柳杉人工林在不同強度疏伐處理前後與若干年的平均胸徑生長(Weng et al. 2011)置入邱氏密度管理量表，以論述邱氏密度管理量表在評估疏伐前後的實用性與特質；同時引述長期試驗地歷年的生長變化(Cheng et al. 2021)評估「(age-DBH-density diagram)」組圖與「age-QMD-density diagram」組圖兩種組圖之間使用上的差異。最後利用Ashton and Kelty (2018)論及的四種定量疏伐原則，以林務局數據為例製作模擬的數值置入邱氏密度管理量表進一步討論，由此了解不同疏伐原則在邱氏密度管理量表上的應用變化。

結果

一、各齡級與各百分層級生長

進一步統計整合Chiou et al. (2020)資料與新增數據值結果，各齡級資料結構如Fig. 2所示，平均胸徑與QMD的生長隨著齡級增加(Fig. a, b)，林分密度的數量隨林齡減少(Fig. 2c)，QMD則為11.1至41.1 cm之間，平均林分密度為564株 ha^{-1} 至2376株 ha^{-1} 之間，偵錯反饋後的統計數據與(Chiou et al. 2014)列出的胸徑平均值僅有稍微差異，整體趨勢變化一致。由各齡級變化間可以發現臺灣地區柳杉人工林之胸徑齡級25年前生長相對較快速，齡級10、15、20、25間的胸徑定期生長量分別為5.4、3.3及3.0 cm，

齡級25年後每隔5年齡級約成長2 cm以下；而QMD在齡級10、15、20、25年間的定期生長量分別為5.6、3.4及3.1 cm，齡級25年後每隔5年齡級約成長2.2 cm以下。林分密度則是在齡級35年以前每五年平均的下降數量為200~500之間，齡級35年以後平均每5年約減少都在約100株以下。

二、擬合結果

各齡級的不同PR曲線組如Fig. 3-5所示，其中Fig. 3中的PR50曲線即等同於Chiou et al. (2014)發表之臺灣地區之柳杉林分平均生長基線。平均胸徑與QMD的擬合各參數與其結果如Tables 1與2所示，其RMSE分別介於0.251至0.412 cm之間以及0.798至1.005 cm之間，MAPE介於0.0327%至0.0731%之間以及0.1640%至1.1019%；平均胸徑各PR的殘差值分布介於-1.754與1.627之間，而QMD各PR的殘差值分布介於-2.477與0.667之間。

相較之下，兩者的 R^2 皆高達0.992以上，QMD的RMSE與MAPE皆略高於平均胸徑，綜合來看平均胸徑比QMD有較佳的擬合結果，由Fig. 6a與Fig. 6b能觀察到QMD比平均胸徑(DBH)的模擬值有較大的誤差，究其原因，是由於計算QMD時所計算的單木胸高斷面積對胸徑較大的樹賦予較大的權重，容易使胸徑較大的樹成為偏高的極端值，而模擬值通常接近平均趨勢，因此計算QMD時的殘差值分布會呈現較多的負值。

特別是，Schnute生長模式也能被應用在隨時間遞減的魚類生長變化中(Maunders 2001, Punt et al. 2016)，雖然軌跡具相反的方向性，

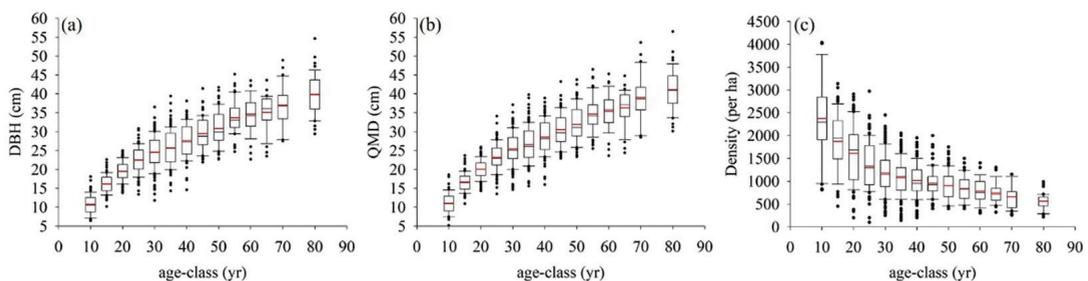


Fig. 2. Box plots of the data structure for each age class.

但仍能擬合出其生長曲線變化。擬合林分密度隨時間遞減的參數特質在PR10時屬於第7型曲線($0 \leq a \leq -b \cdot \log(y_2/y_1)/(t_2-t_1)$, $b < 0$)，PR20至PR90皆屬於第6型曲線($a < 0$, $b < 0$)。原本第6型的曲線在 $t = 0$ 時 $y = 0$ ，第7型的曲線在 $t = 0$ 時具有 $y = p$ —漸進線，兩者在 $t = q$ 時代表生物體的 y 向Y軸正向無限生長；而使用遞減的林分密度數據擬合時則呈現曲線特質左右相反的結果，在 $t = 0$ 的時候代表生物體的 y 向Y軸正向無限生長。由於林分密度的起始值不是0，曲線在PR10的曲線即呈現林齡($t = 10$)時曲線具有起始值1239株，隨時間遞減至80年生時為365株，而PR20至PR90的林分密度曲線同樣在林齡(t)

= 10時曲線各自有起始值(Fig. 5)，並隨時間遞減至80年生時各自具有一最小的模擬值(Table 3)；理論上當 $t = \infty$ 時PR10的曲線會趨近於0，而其他曲線將各自趨於一定值。

林分密度各PR擬合的RMSE分別介於25.2411至35.6569 ha^{-1} 之間，MAPE分別介於0.0020%至0.0120%之間(Table 3)，其殘差值在-76至94之間，齡級20、70、45有較大的誤差分布(Fig. 6c)，細究樣本分布，這些齡級的PR10與PR90皆有較大的模擬誤差，是由於本身為極端值所致。

三、量表的使用與應用實例

邱氏密度管理量表的製作為結合前述樣

Table 1. Fitted results of the Schnute growth model for each percentile rank (PR) of diameter at breast height (DBH)

PR	Parameter				RMSE (cm)	MAPE (%)	R ²
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>y</i> ₁	<i>y</i> ₂			
PR10	-0.025	3.704	7.4	33.1	0.4122	0.0556	0.992
PR20	-0.021	3.542	8.5	35.4	0.3260	0.0423	0.995
PR30	-0.018	3.361	9.4	37.0	0.2773	0.0342	0.996
PR40	-0.017	3.320	10.1	38.5	0.2538	0.0327	0.997
PR50	-0.014	3.190	10.8	39.7	0.2514	0.0366	0.998
PR60	-0.012	3.107	11.4	41.1	0.2674	0.0357	0.998
PR70	-0.010	2.997	12.1	42.5	0.2795	0.0402	0.998
PR80	-0.009	2.913	12.9	44.1	0.3127	0.0461	0.998
PR90	-0.006	2.803	14.0	46.3	0.3887	0.0731	0.997

RMSE, root mean squared error; MAPE, mean absolute percentage error.

Table 2 Fitted results of Schnute growth model for each percentile rank (PR) of the quadratic mean diameter (QMD)

PR	Parameter				RMSE (cm)	MAPE (%)	R ²
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>y</i> ₁	<i>y</i> ₂			
PR10	-0.024	3.640	7.5	34.4	0.7976	0.1640	0.994
PR20	-0.020	3.457	8.7	36.7	0.8035	0.1419	0.996
PR30	-0.018	3.357	9.6	38.4	0.8185	0.1333	0.998
PR40	-0.015	3.191	10.4	39.8	0.8106	0.1244	0.997
PR50	-0.014	3.162	11.1	41.2	0.8434	0.1209	0.998
PR60	-0.012	3.062	11.8	42.6	0.8702	0.1145	0.998
PR70	-0.011	3.011	12.4	44.1	0.8960	0.1082	0.998
PR80	-0.009	2.892	13.3	45.8	0.9253	0.1034	0.998
PR90	-0.006	2.718	14.5	48.2	1.0047	0.1019	0.997

RMSE, root mean squared error; MAPE, mean absolute percentage error.

Table 3 Fitted results of Schnute growth model for each percentile rank (PR) of stand density

PR	Parameter				RMSE (cm)	MAPE (%)	R ²
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>y</i> ₁	<i>y</i> ₂			
PR10	0.004	-1.556	1239	365	33.5789	0.0120	0.970
PR20	-0.006	-1.824	1632	447	31.0663	0.0066	0.988
PR30	-0.011	-1.945	1914	506	29.2916	0.0046	0.993
PR40	-0.014	-2.047	2156	557	27.7446	0.0036	0.995
PR50	-0.017	-2.126	2382	604	26.4328	0.0029	0.996
PR60	-0.019	-2.201	2609	651	25.2411	0.0024	0.997
PR70	-0.021	-2.274	2852	701	25.5762	0.0020	0.997
PR80	-0.023	-2.320	3135	761	29.6485	0.0020	0.997
PR90	-0.026	-2.411	3528	843	35.6569	0.0020	0.997

RMSE, root mean squared error; MAPE, mean absolute percentage error.

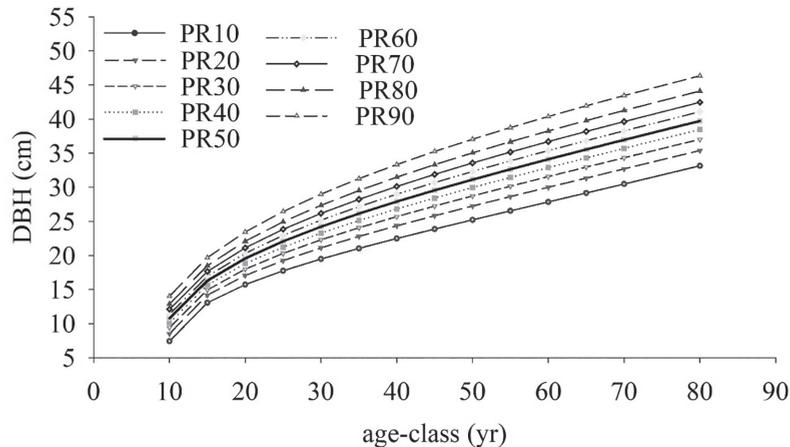


Fig. 3. Fitted curve group of the diameter at breast height (DBH)-age distribution for each percentile rank (PR).

區各齡級以生長模式建立之理論模式模擬結果(Figs. 3-5)，依據各齡級與PR等級分別連線時，將林齡外推10年，其林齡10至90之「林齡-QMD-林分密度」組圖與「林齡-平均胸徑-林分密度」組圖如Figs. 7 and 8所示，其中PR50之曲線即臺灣地區柳杉平均的「林齡-林分胸徑生長-林分密度」變化曲線；我們能從曲線直接標記出目標林分的理論齡級、林分密度PR等級、林分胸徑亦可反推回去做對照。

量表的使用方法，首先於PR50的生長基線中標記出符合目標林分林齡等級的點位為基線點位，再將目標林分的林分密度與胸徑於量表中標記出實際點位，由此比對實際點位在量表

中的林分密度PR等級與基線林齡，當量表中的實際點位位於基線點位左上方時，此時該林分的實際點位密度PR等級高於生長基線，同時胸徑的基線林齡高於實際林齡，相對而言屬於密度偏高且胸徑生長偏低的林分，此時需要綜合基線點位與實際點位的相對位置以及林分現況判定該林分是否需要進行間伐。

而臺灣常用的密度管理措施大多採用下層疏伐，當判定需要疏伐時，則進一步對照生長基線擬定株數或BA疏伐率，在選定疏伐木以後，藉由生長基線、基線點位、實際點位的相對位置評估疏伐前後的林分狀態，由此判斷疏伐量是否適當，最後透過疏伐後的點位來預測

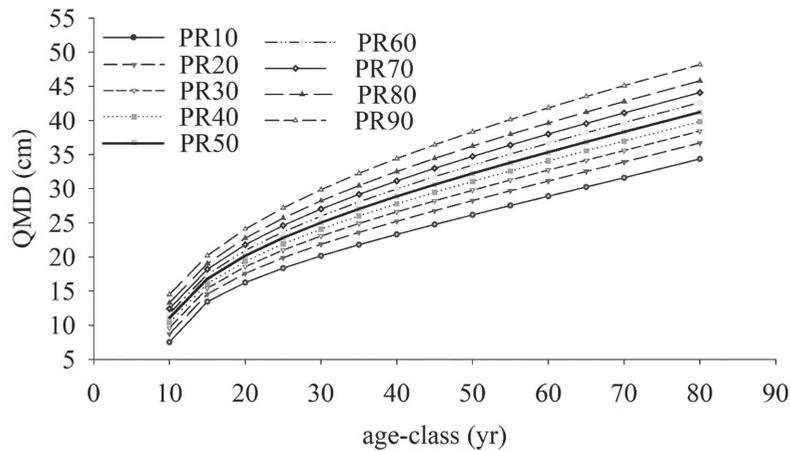


Fig. 4. Fitted curve group of the quadratic mean diameter (QMD)-age distribution for each percentile rank (PR).

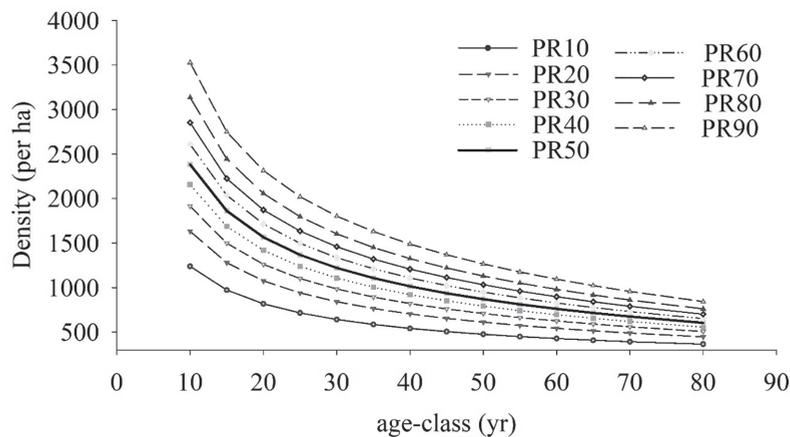


Fig. 5. Fitted curve group of stand density-age distribution for each percentile rank (PR).

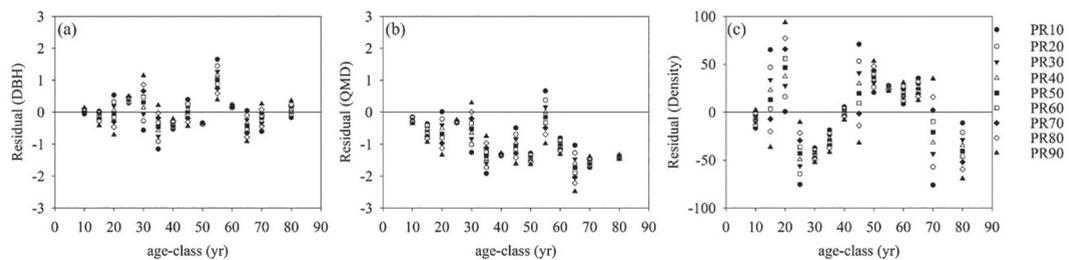


Fig. 6. Simulation results of the residual distributions of diameter at breast height (DBH), quadratic mean diameter (QMD), and stand density. (a) DBH, (b) QMD, (c) stand density.

未來林木生長是否能滿足需求。

以Weng et al. (2011)研究中的強度疏伐林分為例，該林分於林齡28年生時進行平均強度

78%的株數疏伐率。以紅色生長基線上的28年生疏伐前基線點位為比較的參考點，其28年生林分密度的疏伐前生長基線(PR50)與平均胸徑

為 1271 ha^{-1} 與 23.4 cm (Fig. 8a black dot)，而其疏伐前林分結構的實際點位 (Fig. 8a green dot) 位於參考點的左上方，林分密度為 2365 ha^{-1} ，PR等級高達84，平均胸徑為 20.5 cm ，換算基線林齡為21.9年生，相對為密度偏高且生長量偏低的林分，滿足建議進行間伐的條件。

假設其經過評估後，進行了株數疏伐率78%的下層疏伐，疏伐後林分實際點位的相對位置由右上方的綠點移動至左下方的藍點 (Fig. 8, blue dot)，其疏伐後林分密度與平均胸徑為 515 ha^{-1} (PR17)與 28.2 cm ，換算基線林齡為40.9年生；然而，在不疏伐的情況下，8年後(36年生)基線點位 (PR50) 的林分密度與平均胸徑為 1081 ha^{-1} 與 26.4 cm (Fig. 8, gray dot)，由此比較能發現疏伐後的林分平均胸徑提升至未來年分的林分結構，並超過未疏伐8年後的状态，而密度PR等級由84降為17。

在量表中隨著年齡的增加，理論上無論林分密度與平均胸徑會沿著點位所屬的曲線軌跡移動，疏伐後8年的基線林齡應為48.9年生 (Fig. 8, purple dot)，其點位對應的林分密度與平均胸徑為 470 ha^{-1} (PR17)與 30.8 cm ，但實際上為圖10黃色的點位，其林分密度與平均胸徑為 515 ha^{-1} (PR25)與 33.4 cm ，其生長量大於生長基線的理論值(30.8 cm)，同時8年內無林木枯死紀錄，因此相對林分密度上升至PR25等級，可見

此疏伐作業提升生長量同時也具有降低死亡率(競爭)的效益。

綜觀Weng et al. (2011)其他樣區疏伐前後與8年後數據變化，可以發現其疏伐後的皆有死亡率停滯同時生長量增加的現象；而疏伐後會促進留存木的生長與降低死亡率、改變林分結構，在不同樹種之間的不同強度皆是如此 (Li and Yen 2010, Chen and Yen 2018)。邱氏密度管理量表論及的疏伐後林分密度PR等級是一個調整後的理論狀態值，實際的疏伐後的林分密度PR等級軌跡應會高於理論值。

當利用邱氏密度管理量表預測疏伐後林分的生長動態時，我們能從疏伐前後所對應的點位軌跡得知第一步的理論值，若干年調查後能得知包含疏伐效益的第二步理論值，此時平均胸徑對應的林齡與林分密度的PR軌跡皆會上修，前者因為疏伐促進生長量，後者因為競爭效應的消除或延遲；俟疏伐效益消失後，林分生長穩定時，生長將會依循該PR的軌跡進行。由此可藉由邱氏密度管理量表能評估其疏伐前後的差異以及未來生長與死亡率的效益。

若以Ashton and Keltly (2018)所論及的疏伐(或間伐)原則進行作業，疏伐必需同時考量空間配置與林木的大小，就量表中的點位相對位置來看，疏伐後都會使目標林分的實際點位向下移動，而點位相對位置或左或右的移動，依不

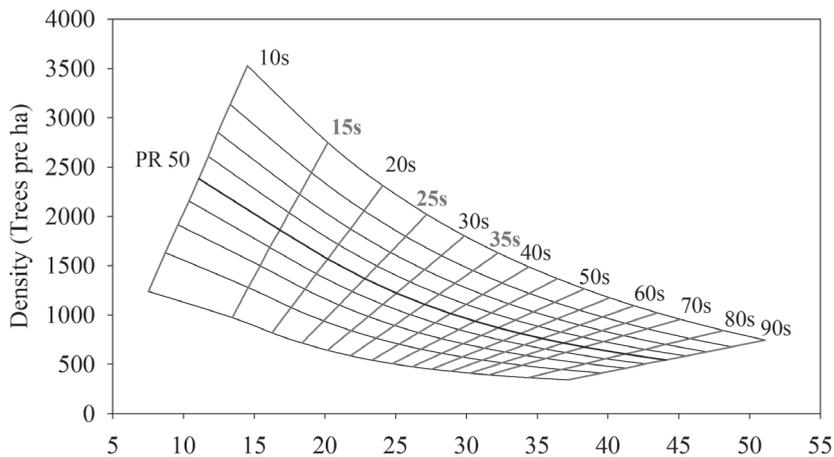


Fig. 7. Age-quadratic mean diameter (QMD)-density diagram of Chiou's density management diagram. The thick black line represents the 50 percentile rank (PR50) of the growth baseline.

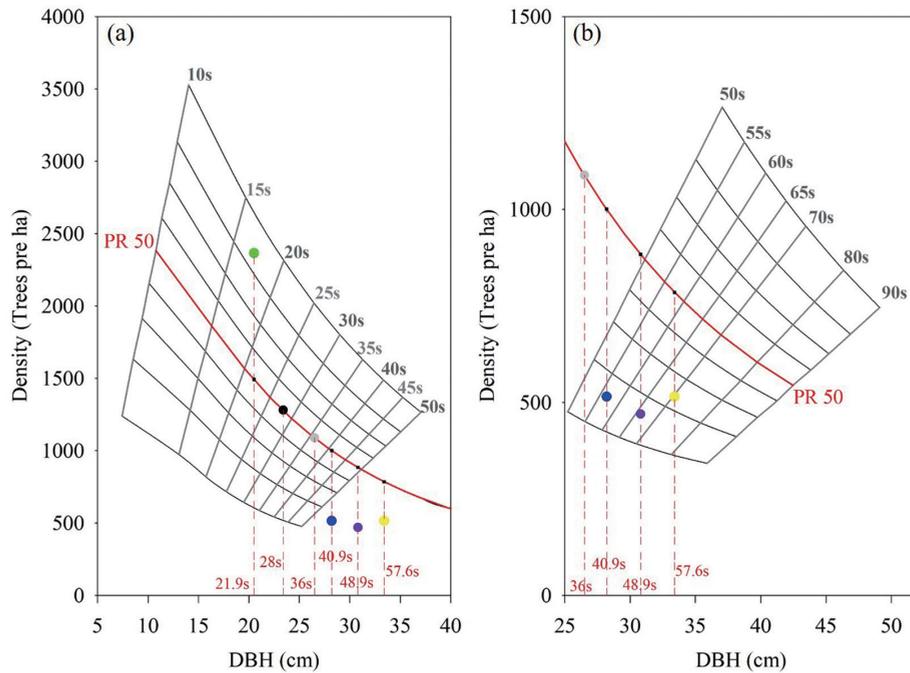


Fig. 8. Evaluation results of a high-intensity thinning plot (Weng et al. 2011) in Chiou’s density management diagram. The red line represents 50 percentile rank (PR50) of the growth baseline, the black dot represents the baseline position at 28 yr old, the gray dot represents the baseline position at 36 yr old, the green dot represents the practical position at 28 yr old, the blue dot represents the practical position after thinning at 28 yr old, the purple dot represents the baseline position at 8 yr after thinning, the yellow dot represents the practical position at 8 yr after thinning, and the red dotted lines and black squares are auxiliary lines and points. For comparison and identification of their relative positions, the growth baseline and points were extended and repeated.

同疏伐作業與疏伐度而定，吾人能藉由疏伐前後的基線點位與實際點位的相對位置評估疏伐度是否足夠，並進一步預測伐採後的林分生長軌跡。

討論

一、曲線參數性質

Schnute生長模式的 a 、 b 值代表著曲線的形狀與趨勢，在不同條件下皆能轉換為不同的生長模式，若將各PR的 a 、 b 、 y_1 、 y_2 、 t_1 、 t_2 參數其轉換為Richard生長模式(Richards 1959)時，所換算出來的各參數與PR呈現相關性，但不符合參數在生物上的意義；雖然如此，我們仍能

從參數 a 的變化得知平均胸徑與QMD的PR等級越高增加效率就越高，而林分密度則是PR等級越高，減少的效率就越低。

Yang and Feng (1989)曾應用Chapman-Richards與Schnute兩生長模式擬合5種栽植距離的柳杉人工林初期生長情形，其林分性態值其各自呈現出Schnute生長模式的不同種類曲線，特別是無漸近線或是生長再生的生長趨勢較Chapman-Richards生長模式有較佳的擬合結果，雖然有關生物性的解釋欠周全，但是再生的生長趨勢能夠描述其林分生長釋放後的現象。由於絕大部分的生物生長皆具有其上限，故生長模式的使用皆建議使用具有漸進線、反曲點、S型曲線進行擬合。

值得注意的是，Table 1與Chiou et al. (2014)發表之各PR分級曲線參數相較，本研究平均胸徑與QMD的 a 參數皆小於零， b 參數皆大於1，屬於Schnute生長模式(Schnute 1981)的第3型曲線($-b \cdot \log(y_2/y_1)/(t_2-t_1) < a \leq 0, 1 < b$)，其特性為無漸進線，曲線具反曲點，且具有再生現象，表示初期生長旺盛，經過一段時間生長緩慢後，又轉為旺盛，相似於林木隨時間生長經歷鬱閉、競爭、生長釋後的胸徑生長特性。細究參數上的差異主要受到兩個原因影響，主要是置入模式的應變數與自變數不同，由於本研究所使用的最小林齡級為6-10年生，以及偵錯反饋後的統計值略微變動所致。

雖然Figs. 3-5的曲線組皆不具有漸進線與反曲點的S型生長特質，但曲線形狀與軌跡變化皆在合理的生長理論值內，此三曲線軌跡為收錄全臺灣數據所擬合結果，其 R^2 值皆達0.99以上且偏差的範圍皆在0.16%以內，顯示該曲線能在其範圍內進行有效的模擬與應用，以此三曲線組代表臺灣地區柳杉人工林平均胸徑、QMD以及林分密度之分布情形，藉由PR50的曲線為參考以評估臺灣各地區之柳杉人工林生長情形，以作為各林分採取經營活動之基礎評估資訊。

二、兩種林分平均胸徑值的差異

進一步比較「林齡-平均胸徑-林分密度」組圖與「林齡-QMD-林分密度」組圖此兩種量表使用上的差異，將(Cheng et al. 2021)部分數據置入量表中，以初始栽植密度為 3000 ha^{-1} 的樣區生長資料為例，其於1944與1955兩次調查記錄為風災過後進行，透過編號確定風害木後，以1943年(15年生)與1954年(26年生)的調查資料定義為風害前後的統計基準。

將部分的林分結構數據置入兩種量表如Fig. 9所示，Fig. 9a、Fig. 9c黑點分別代表林齡15年生與26年生時的生長基線上的基線點位，兩次的風害後皆使得林分實際點位由左上至右下移動(Fig. 9, dark-green lines)，其干擾效果非人工疏伐作業，但風害所移除林木的結果類似下層疏伐，使得在生長基線上的基線林齡增加且林分密度PR等級下降(Fig. 9a, c, blue dash)。

比較兩次風害前後在兩種直徑量表所對應到的林分結構變化如Table 4與Fig. 9所示，在林齡-平均胸徑-林分密度圖的變化中，第一次風害前後的基線林齡由14.9上升至16.5，且林分密度由PR73下降至PR60，第二次的風害前後基線林齡的變化則是由24.8上升至29.2，且林分密度由PR65下降至PR47(Fig. 9a)；而在林齡-QMD-林分密度圖的變化中，第一次風害前後的基線林齡由14.9上升至16.3，林分密度由PR73下降至PR60，第二次的風害前後基線林齡的變化則是由24.6上升至28.5，林分密度由PR64下降至PR46(Fig. 9c)。

檢視單一樣區林分胸徑-密度結構在兩種邱氏密度管理量表的長期變動，其發生風害後時，生長基線上的基線林齡值皆會增加，但是林分密度PR等級則相對降低，特別是第二次風害後由26年生至58年生有連續的調查紀錄顯示枯死率停滯，使得相對的PR等級隨著增加至PR70左右；其中平均胸徑與QMD對應的基線林齡之間的差異在2.30%以下，而林分密度的PR評估值差異也在2.13%以下(Table 4)，兩者差異皆在5%以下，且其變動亦具一致性。由此可知，無論是以平均胸徑或是QMD為量測基準的量表，兩者的變動一致，也具有相同的評估效果。

值得注意的是，QMD普遍被認為較平均胸徑適合作為管理密度的要素，是因為它具有結合單位面積林分密度和胸高斷面積(basal area)兩項林分參數的特質；Curtis and Marshall (2000)曾論及林業常用的平均林分胸徑(average stand diameter)指的不是林分內林木胸徑的算術平均數(arithmetic mean of diameters)，而是二次平均胸徑(QMD)，特別是Reineke (1933)發表著名的立木度(stand density index: SDI)也是基於QMD與林分密度關係導出的結果，除此之外，許多松木的林分密度管理相關研究也是如此。

三、密度管理模擬

為進一步展示量表在密度管理的實用性，引述Ashton and Kelty (2018)對於下層疏伐(Low Thinning)、選擇疏伐(Selection Thinning)、冠層疏伐(Crown Thinning或稱Dominant

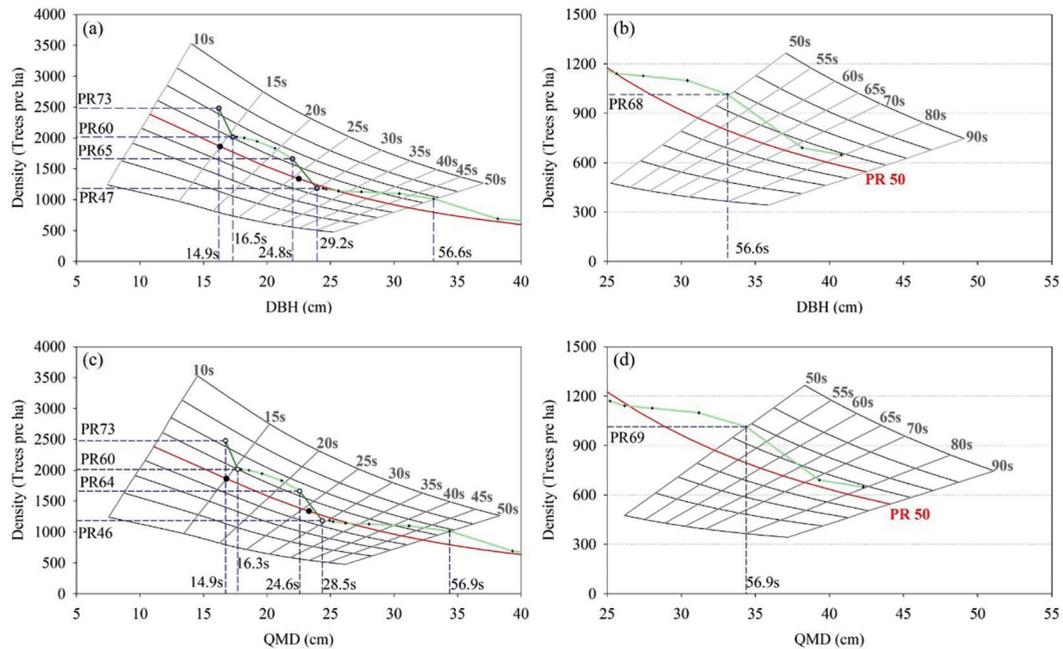


Fig. 9. Assessment of long-term growth changes via Chiou's density management diagram. The red line represents 50 percentile rank (PR50) of the growth baseline, the green line represents the plot trajectory of long-term growth, and the dark-green lines and hollow circles represent the position change before and after wind damage, respectively.

Thinning)、機械疏伐(Mechanized Thinning或稱 Geometric Thinning)等四種疏伐方法的徑級分佈情況進行模擬，進行BA疏伐率為40%的定量疏伐模擬，模擬時考量現場選木的當下會同時考慮林木位置與疏伐木大小，在主觀判斷上做輕微調整：例如當一小區域內的林木皆符合疏伐木徑級時，為避免產生過大空隙，則不會砍伐該區域所有林木，或屬於留存木徑級的林木生長於同一小區域內時，為避免過度擁擠，所以伐除數株預定留存木，基於經驗法則各分配8%的株數隨機分布在其他徑級。

以Chiou et al. (2020)中的林務局數據為參照，利用Excel亂數表製作出一林分數據範本(Example data)，其數據符合平均胸徑 25.9 ± 8.2 與每公頃1316株的狀態，其徑級分佈呈正偏歪，藉邱氏密度管理量表評估其疏伐前後模擬狀態。

以PR50的生長基線與43年生的基線點位(Fig. 10, red dot)為評估參考點，林分密度為

968 ha^{-1} ，平均胸徑為28.9 cm；而數據範本為平均密度與平均胸徑 1316 ha^{-1} (PR61)與 25.9 ± 8.2 cm的林分(Fig. 10, black dot)，位於基線點位的左上方，滿足建議進行間伐的條件。將四種疏伐的模擬置入邱氏密度管理量表結果如Table 5與Fig. 10所示，四種疏伐模擬只有下層疏伐的平均胸徑與對應的基線林齡皆上升，而模擬機械疏伐後的平均胸徑恰巧不變，但對應的基線林齡下降，標準差也降低，另外兩種疏伐模擬的平均胸徑與對應的基線林齡皆下降。

下層疏伐主要移除較小胸徑以及不良樹冠級的林木，目的是藉由移除競爭性較小的下層林木，將生長潛力集中在優勢木及次優勢木徑級的林木。尤其高強度的疏伐率下，往往會導致樹木分佈不均，並且有必要去除一些形質最差的次優勢木，因此會留下少部分形質較佳的下層木。臺灣許多相關的伐木業務或是林業研究大多採用下層疏伐(Lee et al. 2001, Wang et al. 2009, Li and Yen 2010, Weng et al. 2011,

Chen and Yen 2018)。

下層疏伐模擬的徑級分布如Fig. 11a所示，其株數疏伐率為61.7%，由於移除的林木幾乎屬於中下層林木，平均胸徑由25.9 cm 增加至33.1 cm，基線林齡上升為56.6年生同時林分密度PR 下降至21(Table 5)，點位移動到基線點位的右下方(Fig. 10, blue dot)，其疏伐後的生長可期望與Weng et al. (2011)相似。Lee et al. (2001)曾搭

配林木位置圖模擬4種下層疏伐的選木方法，結果顯示應用胸徑級法將獲得比隨機法較高的平均胸徑，其4種方法各呈現不同的結果，經營者可依規劃需求進行參考。

冠層疏伐是間伐作業中一種獲取較高經濟效益的手段，也是一種重新調整林地生長潛力的方針，常施作於闊葉樹人工林，主要伐採屬於冠層之次優勢木或形質較差的優勢木，促進最具生

Table 4. Comparison results of the long-term growth (Cheng et al. 2021) in Chiou's density management diagram.

Age (yr)	TPH	DBH / QMD of simulated age	deviation (%)	Evaluation PR of Density	deviation (%)
15	2479	14.9 / 14.9	0.00	73 / 73	0.00
(15)	2014	16.5 / 16.3	1.21	60 / 60	0.00
16	2014	17.0 / 16.8	1.18	61 / 61	0.00
17	2000	17.9 / 17.6	1.68	63 / 63	0.00
20	1944	19.4 / 19.1	1.55	65 / 64	1.54
23	1831	22.1 / 21.7	1.81	66 / 65	1.52
26	1662	24.8 / 24.6	0.81	65 / 64	1.54
(26)	1183	29.2 / 28.5	2.40	47 / 46	2.13
27	1183	30.4 / 29.7	2.30	48 / 47	2.08
28	1169	31.0 / 30.4	1.94	49 / 48	2.04
31	1141	33.6 / 32.9	2.08	50 / 49	2.00
40	1127	38.6 / 37.6	2.59	56 / 55	1.79
50	1099	47.7 / 46.8	1.89	65 / 64	1.54
58	1014	56.6 / 56.9	-0.53	68 / 69	-1.47
72	690	74.5 / 73.4	1.48	55 / 55	0.00
82	648	83.9 / 83.8	0.12	60 / 60	0.00

(15)* and (26)* represent statistical values after wind damage.

TPH, tree per hectare; DBH, diameter at breast height; QMD, quadratic mean diameter; PR, percentile rank.

Table 5. Evaluation results of 4 kinds of thinning simulation

Treatment	DBH	Simulated age	Remaining trees (ha ⁻¹)	PR of estimation	Thinning rate of TPH
Baseline point (PR50)	28.9	43	968	50	-
Example data	25.9±8.2	34.4	1316	61	-
Low Thinning	33.1±6.6	56.6	504	21	61.7
Crown Thinning	25.6±9.5	33.6	762	28	42.1
Selection Thinning	23.0±4.0	27.1	1053	36	20.0
Mechanized Thinning	25.9±7.5	34.4	790	29	40.0

The baseline position (50 percentile rank (PR50)) represents the baseline position on the baseline at 43 yr old. Example data were made by using an EXCEL sheet which is in line with the average diameter at breast height (DBH) of 25.9±8.2 and the trees per hectare of 1316. TPH, tree per hectare.

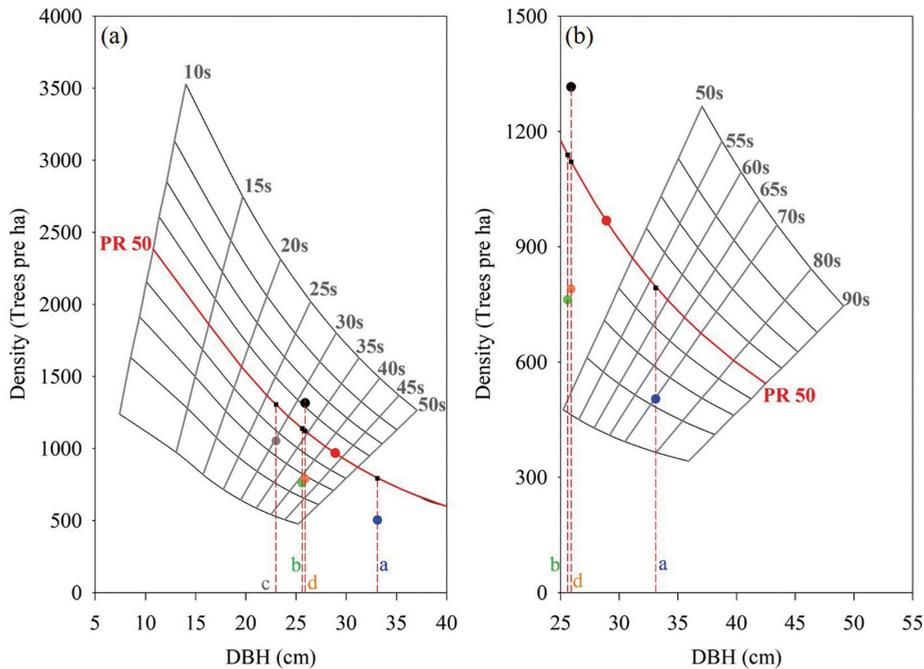


Fig. 10. Evaluation results of four kinds of thinning simulation in Chiou's density management diagram.

The red line represents 50 percentile rank (PR50) of the growth baseline, the red dot represents the baseline position at 43 yr of age, the black dot represents the practical position at 43 yr of age, the blue dot represents the position after Low Thinning, the green dot represents the position after Crown Thinning, the gray dot represents the position after Selection Thinning, the orange dot represents the position after Mechanized Thinning, and the red dotted lines and black squares are auxiliary lines and points. For comparison and identification of their relative positions, the growth baseline and points were extended and repeated.

長希望的期望樹(promising trees)，如優勢木、具潛力的中庸木與被壓木的生長，並保留豐富的樹冠結構，通常是逐次進行且需要較佳的技術，一般而言後續的施業常搭配下層疏伐或機械疏伐(Wang 1964)。

冠層疏伐模擬的徑級分布如Fig. 11b所示，其株數疏伐率為42.1%，由於移除冠層林木使得平均胸徑由25.9 cm降至25.6 cm，基線林齡下降為33.6年生同時林分密度PR下降至28 (Table 5)，林分結構調整到基線點位的左下方(Fig. 10, green dot)，呈現疏伐後林地產能下降的現象，考量疏伐具有促進留存木生長的效益，其未來的生長量可能會優於該PR的點位理論值，此法應較適合實際點位在基線點位右上方的林地。

選擇疏伐之收益常常會高於冠層疏伐與下層疏伐，而整體林分木材的利用率也高於其它疏伐作業，主要伐採優勢木而選留之次優勢木、中庸木與小型之優勢木，通常能發育成通直無節、枝條較少之林木施行選擇疏伐，使生長旺盛的樹種移除，剩下的留存木成為母樹，但容易使次代皆非生長旺盛之品系(Wang 1964)，不適合連續進行。

由於主要移除的對象是優勢木，故徑級分布趨勢將原本的正偏歪往負偏歪推移(Fig. 11c)，選擇疏伐模擬後的株數疏伐率為20.0%，使模擬值的平均胸徑由25.9 cm下降至23.0 cm，基線林齡下降為27.1年生同時林分密度PR下降至36 (Table 5)，亦呈現疏伐後林地產能下降的

現象，點位移動到基線點位的左下方(Fig. 10, gray dot)，此種疏伐方式有助於次優勢木與中間木有較佳的提升效果。Schädelin (1942)最早定義的選擇性疏伐(Auslesedurchforstung)其清楚地標示了最終收穫木(final crop trees)數量的逐漸進展，其概念看起來相對靈活和資源密集性，但在隨後的每次疏伐作業中都會重新評估它們對最終伐期的適用性。近年日本學者(Watanabe 2005, Mochizuki et al. 2020)提出具相似概念且高度靈活性的中層疏伐規畫方針，較適合長伐期大徑木育林體或是大徑級之恆續收穫林的規畫。

機械疏伐是以間隔或距離來選留伐採林木，區分為間隔疏伐(Spacing Thinning)或稱空間疏伐，以及行列疏伐(Row Thinning, Line Thinning)，其適用於未施行過疏伐之擁擠幼林，僅考量空間的配置，而非前述三種疏伐以冠層層級區分留存木，因此大多建議只適用於第一次的疏伐，不該再行施用(Wang 1964)。Lo-Cho et al. (1997) 與Lin et al. (2010)曾於棲蘭山林區的柳杉人工林利用行列疏伐營建複層林，初步研究證實檜木栽植作業可使林相更新為以檜木為主的人工林，在持續的育林措施之下，可更新為檜木及闊葉樹混合林。

進行機械疏伐模擬後的徑級分布如Fig. 11d所示，隨機移除了各徑級的林木使得模擬值的平均胸徑與株數移除率恰巧不變，因此基線林齡與實際值相等，但是標準差變小，同時林分密度PR下降至29 (Table 5)，點位移動到基線點位的正下方(Fig. 10, orange dot)，此種作業適合於造林初期第一次使用或是用以建造複層林的規畫。

綜合前述四種疏伐模擬在邱氏密度管理量表的評估結果，疏伐後都使得林分密度PR下降，其變動幅度依其疏伐率而定；除了下層疏伐以外，疏伐後的點位大多移動到基線點位的左下方，呈現疏伐後產能下降的林分狀態。然而，在邱氏密度管理量表中林分點位所在的曲線即是未來生長的軌跡，我們能藉此預測未來生長情況。而疏伐具有調節林分密度與提升留存木生長的效益，普遍而言皆高於未疏伐的林

地，由於量表為彙整未疏伐林分而成的綜合理論曲線，因此實際上疏伐後的生長通常會優於曲線模擬的軌跡。

在密度管理的策略中，通常會混合不同的伐木作業逐漸轉換林分冠層的分佈與鬱閉度，而各國學者的疏伐措施依其學派與其適用情形(樹種)而大同小異，但無論如何都希望完成輪伐期時獲得最大的效益。然而，疏伐為較常見的密度管理手段；伐區作業中，又分為主伐收穫(final yield)與間伐收穫(intermediate yield)，而間伐收穫為由造林後至伐期間，撫育伐所得之木材，如除伐(cleaning)，疏伐(thinning)等是，但在非成熟林木且不更新之臨時伐採量亦屬之(Zhou 1968)。Wang and Liu (1964)論到「疏伐為間伐之一種，雖為一重要之方法，然不應統稱為間伐。臺灣各的所施行之撫育伐採，幾全屬疏伐，然而以間伐名之，甚感不當，亟應改稱疏伐，藉使名副其實」。

日本學者Terasaki (1905)曾修編國際林業試驗場聯合會議協定的選木分類法，進而制定出由樹冠分級的間伐(thinning)選木原則，其作業法常以未滿30年生之針葉樹單層林為的對象，在施作上類似於合併下層疏伐(low thinning)與除伐(cleaning)的措施；而Ashton and Kelty (2018)認為間伐(intermediate cutting)也稱為疏伐(thinning)，為主要致力於藉由調整林分密度或物種組成來控制林分的生長，並在書本中詳述六種疏伐的施作原則。

綜觀臺灣林業單位所採用的下層疏伐原則，似乎同時包含了Terasaki (1905)所定義的定性間伐原則與Ashton and Kelty (2018)所詳述的定量疏伐原則。或許在名詞翻譯或是不同國家學者論點的差異所致，疏伐與間伐名詞的定義容易產生混淆；然而，當我們綜合育林學的論點來看時，間伐應為在輪伐期內對於時間與空間的密度管理措施，疏伐為間伐作業的其中一項，本文與Wang and Liu (1964)論點一致。

從生產潛力來看現階段臺灣的柳杉人工林密度管理，其缺乏關於所有處理第一次間伐時間和間伐週期的細節規畫，若應用Yang (1975)發表的林分密度管理圖來規劃，其進行間伐與

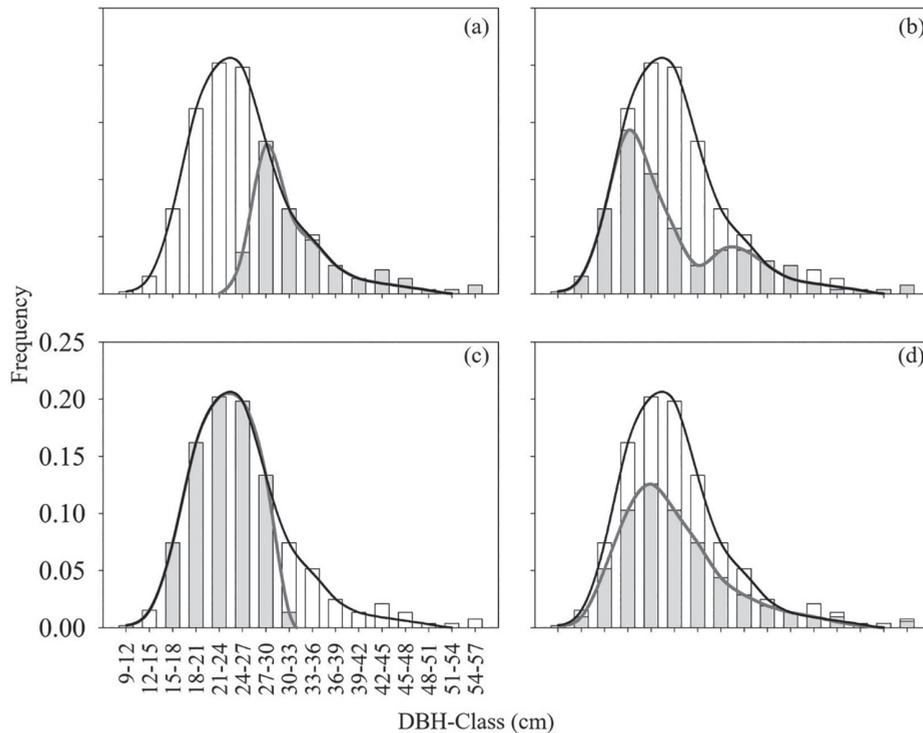


Fig. 11. Results of four types of thinning simulations.
(a) Low Thinning, (b) Crown Thinning, (c) Selection Thinning, (d) Mechanical Thinning.
 The black line and blank histogram represent the diameter at breast height (DBH)-class distribution before thinning, the gray line and gray histogram represent the diameter class distribution after thinning, and the part surrounded by the black line and gray line represents DBH-class distribution of thinning trees.

收穫伐時得須沿等平均林分樹高線變化來評估，使用者得先面臨其精準度受到林分高度測量誤差的影響，而其複雜的曲線包含了林分胸徑、林分密度、林分樹高、林分材積、競爭比數等要素，使用時較為難以上手；雖然透過林分密度管理圖能估算林分平均單木材積與林分材積，但目前許多柳杉人工林的現況已經經過預定的輪伐年再加上樹高測量誤差的影響，難以適當採取林分密度管理圖進行規劃。

由於邱氏密度管理量表是由各齡級大量的林分胸徑與林分密度樣本所構成，藉由量表評估臺灣柳杉人工林密度管理方針時，只需要林齡、林分胸徑與林分密度三項較易量測且精準度高的要素即可，最少只需要林分胸徑與林分密度要素即能使用，使用時相對較為簡易，我

們能藉由量表評估目標林分的狀態處於全臺灣的哪個PR等級，也能自由的標記參考點來規劃伐採前後的相對點位，由此作為伐採強度的基準，或由期望的點位反推預定伐採的方針同時也能快速評估一林分疏伐規劃強度是否足夠，相較而言較為輕省方便。

結論

本研究匯整全臺不同齡級的柳杉人工林深究新的密度管理方法，發展出邱氏密度管理量表作為柳杉人工林密度管理的參照基準，有別於較複雜的林分密度管理圖，為較有效的針對柳杉人工林進行密度評估、控制與產能管理。

邱氏密度管理量表的基礎是將大量長期試

驗地與永久樣區之林齡、平均胸徑、QMD、林分密度、胸高斷面積等林分性態值進行資料統計、偵錯反饋與分級後，以Schnute生長模式擬合平均胸徑、QMD及林分株數隨林齡之變化曲線理論值合併之。其平均胸徑各PR的殘差值分布介於-1.754與1.627之間，QMD各PR的殘差值分布介於-2.477與0.667之間，而林分密度的殘差值在-76至94之間，整體而言誤差率皆在0.16%以下，顯示該曲線能在其範圍內進行有效的模擬與應用。

雖然擬合的曲線各參數的生物意義不符合理想的生長模式期望特質，但在曲線範圍內能夠有效描述各PR等級之間的理論軌跡，9條曲線的參數如Tables 1-3所示，以此三曲線組代表臺灣地區柳杉人工林平均胸徑、QMD以及林分密度之分布情形(Figs. 3-5)，吾人能藉由生長基線(PR50)為參考線評估臺灣各地區之柳杉人工林生長情形優劣，也能利用各PR等級曲線參數預測生長，以作為各林分採取經營活動評估資訊之基礎。

量表的構成是將Fig.3-5依據各齡級與PR分別連線，其林齡分布原為10至80年生，再外推90年生的曲線，分別合併成「林齡-QMD-林分密度」組圖與「林齡-平均胸徑-林分密度」組圖，為邱氏密度管理量表(Chiou's density management diagram)兩套組圖，兩者間差異僅在2.3%以下，皆能作為柳杉人工林密度管理的參照基準評估出同樣的結果。

從評估文獻之數據變化結果顯示，透過量表可快速判斷臺灣地區任一塊疏伐前後、未疏伐或缺乏密度管理的柳杉林分整體之生長情形，並比較不同林分間之生長差異(PR等級)，與是否應進行密度管理，也能評估疏伐前後林分的胸徑與林分密度處於何種PR等級；藉由4種疏伐模擬的結果顯示，我們能從量表點出目標林分的實際點位與相對應的基線點位，由相對位置規劃應進行何種疏伐措施，進一步評估伐採後期望生長軌跡，由此作為伐採強度的基準或是預定伐採的方針。雖然無法預測疏伐後未來的林分胸徑平均值上升與林分密度下降效益，但能從已知的調查結果評估其疏伐效益。

邱氏密度管理量表由無疏伐林分或疏伐效

益降低組成的樣本，將各林齡、胸徑與其PR等級的平均增長軌跡聚集而成，對於一特定年齡的林分的胸徑值提供了參考基準，但非絕對的正確答案，較適合鬱閉前或後施行或中後期撫育，幼齡林若為密植或是立地環境較佳也可考慮使用；由Figs. 2-6 顯示了大量樣本的軌跡與其殘差值，我們無法仔細解釋生育地的異同與其交互作用對林分生長產生的影響。藉由量表能評估各種林分的PR等級，以實際點位與平均生長基線相對位置做為參考線或不同PR等級作為參考線，按現實情況所需進行密度管理計劃，在輪伐期內進行有規劃的間伐，並監控可能發生的結果範圍，以確定對未來的預測是否仍然準確或適當。

謝誌

感謝林務局和臺大實驗林兩大林業單位提供柳杉長期生長數據，以及匿名審稿委員的評論與建議，使得本論文至臻完善。

引用文獻

- Ashton MS, Kelty MJ. 2018. The practice of silviculture: applied forest ecology, 10th Edition. New York: J Wiley & Sons.
- Chen YT, Yen TM. 2018. Assessment of stand development, stand structure and forest health of a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantation 7 years after thinning. Q J For Res 40(2):161-78.
- Cheng CP, Chiou CR Chou CY. 2021. Simulating the impacts of wind damage on stand structure and dynamics of plantations: a case study of long-term *Cryptomeria japonica* experimental plots with two spacing trials. Taiwan J For Sci 36(1):51-67.
- Chiou CR, Chan WH, Yang SI. 2014. Establishing the comparison baseline of DBH growth in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantations in Taiwan. Q J Chin For 47(3):287-96.
- Chiou CR, Cheng CP, Yang SI. 2020. Com-

- parison of parametric and nonparametric methods for estimating size–density relationships in old-growth japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantations. *Forests* 11:625.
- Chiou CR, Lin JC, Ho HY. 2012.** The impact of implementing reducing emissions from deforestation and forest degradation (Redd) on import of roundwood and lumber in Taiwan. *Q J Chin For* 45(2):271-87. doi:10.30064/qjcf.201206.0009.
- Cho CL. 2013.** Thinning operation on a Japanese cedar plantation stand in Chu-Tung working circle. Part II. Analysis on an operating cost. *For Prod Ind* 32(2):91-101. doi:10.6561/fpi.2013.32(2).3.
- Curtis RO, Marshall DD. 2000.** Why quadratic mean diameter? *West J Appl For* 15(3):137-9.
- Kao C. 1982.** An economic analysis of the optimal thinning and rotation for *Crypvomera*. Tainan, Taiwan: Department of Industrial Management Science, National Cheng Kung Univ.
- Lee HT, Feng FL, Lin MJ. 2001.** Application of individual tree location map in the thinning operation of Luantan-fir. *Q J For Res* 23(2):77-88.
- Li LE, Yen TM. 2010.** Thinning effects on stand and tree levels of Taiwan red cypress (*Chamaecyparis formosensis* Matsum.) 4 years after thinned. *Q J Chin For* 43(2):249-60. doi:10.30064/qjcf.201006.0006.
- Lin CY, Chiu CM, Lin ST, Chung CH, Lin CL. 2010.** Regeneration development after row thinning in *Cryptomeria japonica* plantations at Chi-Lan-Shan area. *Q J Chin For* 43(2):233-47. doi:10.30064/qjcf.201006.0005.
- Lin YJ, Lee KC, Lin JC. 2002.** Forest carbon sink estimation for Taiwan by biomass-volume relationship method. *J Exp For Natl Taiwan Univ* 16(2):71-9.
- Lo-Cho CN, Chung HH, Chiu CM, Huang CM. 1997.** Establishment of a *Cryptomeria*-based multi-storied plantation by row thinning. *Taiwan J For Sci* 12(4):459-65. doi:10.7075/tjfs.199712.0459.
- Maunder MN. 2001.** Growth of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) in the eastern Pacific Ocean as estimated from tagging data. *Inter-Am Trop Tuna Comm Bull* 22(2):95-131.
- Mochizuki T, Takeuchi T, Mizunaga H, Watanabe S. 2020.** Damage of the regenerating tree caused by mid-layer thinning using cut-over lines in a long rotation management stand. *Jpn For Soc Congr* 131:734. doi:10.11519/jfsc.131.0_734. [in Japanese].
- Punt AE, Haddon M, McGarvey R. 2016.** Estimating growth within size-structured fishery stock assessments: What is the state of the art and what does the future look like? *Fish Res* 180:147-60. doi:https://doi.org/10.1016/j.fishres.2014.11.007.
- Richards FJ. 1959.** A flexible growth function for empirical use. *J Exp Bot* 10(2):290-301. doi:10.1093/jxb/10.2.290.
- Schnute J. 1981.** A versatile growth model with statistically stable parameters. *Can J Fish Aqua Sci* 38(9):1128-40. doi:10.1139/f81-153.
- Schädelin W. 1942.** Die Auslesedurchforstung als Erziehungsbetrieb höchster Wertleistung, 3rd edition. Bern, Leipzig: Paul Haupt.
- Terasaki W. 1905.** Study of thinning pure Japanese larch plantation. *Bull For For Prod Res Inst* 2:97-177.
- Terasaki W. 1963.** Note on the study of thinning pure Japanese larch plantation. *Bull For For Prod Res Inst* 148:51-71.
- Wang TT. 1964.** Thinning operations in America. *Q J Taiwan For* 1(1):63-77.
- Wang TT Liu CC. 1964.** The thinning of practice and value. *Q J Taiwan For* 1(1):2-21.
- Wang YN, Tsai MJ, Liou CF, Cheng CP. 2009.** Effects on growth by low thinning between different stand densities of Taiwan plantations. *J Exp For Natl Taiwan Univ* 23(4):295-307. doi:10.6542/ef-

ntu.200912_23(4).0003.

Watanabe S. 2005. An introduction to theory and practice of the line-thinning and the mid-layer thinning. *Jpn For Soc* 44:18-25. doi:10.11519/jjsk.44.0_18. [in Japanese].

Weng SH, Shen CW, You CH, Lin CY, Chung NJ, Chen PY, Kuo SR. 2011. Effects of thinning on growth and structure of overstorey and understory woody plants of a Japanese fir plantation in northern Taiwan. *Q J Chin For* 44(2):157-81. doi:10.30064/qjcf.201106.0002.

Yang YC. 1975. Studies on the growth and yield of *Cryptomeria* in the Experimental Forest of Taiwan University. *Bull Exp For Natl Taiwan Univ* 116:1-149.

Yang YC, Feng FL. 1989. The application of Schnute growth function to the analysis of

stand structure of man-made forest in Taiwan. *Q J Chin For* 22(3):3-17.

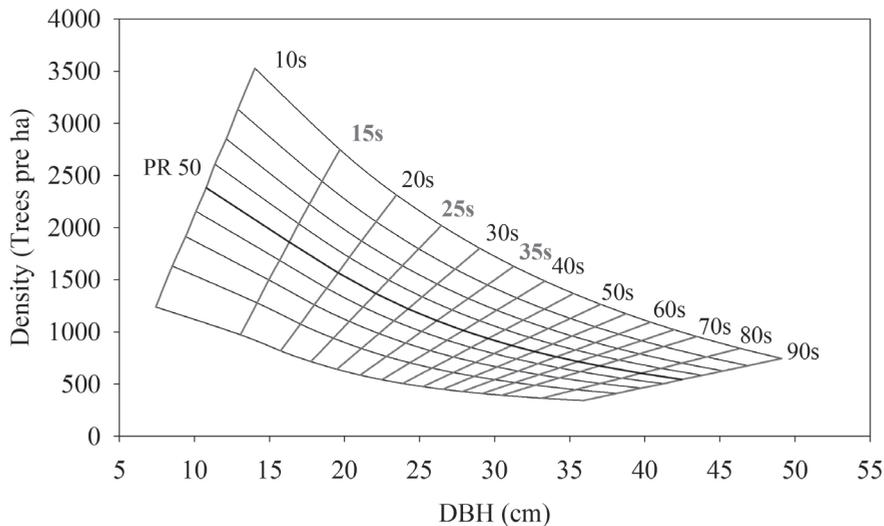
Yoshida T, Noguchi M. 2009. Vulnerability to strong winds for major tree species in a northern Japanese mixed forest: analyses of historical data. *Ecol Res* 24(4):909-19.

Zeide B. 2004. Optimal stand density: a solution. *Can J For Res* 34(4):846-854. doi:10.1139/x03-258.

Zeng HC, Peltola H, Talkkari A, Venäläinen A, Strandman H, Kellomäki S, Wang KY. 2004. Influence of clear-cutting on the risk of wind damage at forest edges. *For Ecol Management* 203(1):77-88.

Zhou Z. 1968. Forest management. city?, Taiwan: National Institute for Translation and Compilation.

附錄



Chiou's Density Management Diagram (age-DBH-density diagram). The thick black line represents the 50 percentage rank (PR50) of the growth baseline.